



包括的感度解析手法を用いたTRU廃棄物処分の成立条件の抽出について

大井 貴夫 曾根 智之 稲垣 学 三原 守弘

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

Extraction of Successful Conditions for Safety Geological Disposal of TRU Waste using a Panoramic Sensitivity Analysis Approach

Takao OOI Tomoyuki SONE Manabu INAGAKI Morihiro MIHARA

Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

放射性廃棄物の処分の安全評価手法開発の一環として、「安全評価上重要度が高いパラメータの同定」及び「処分が安全に成立するために必要なパラメータの条件（成立条件）の抽出」を目的とした統計的手法に基づく感度解析手法（包括的感度解析手法）を構築した。また、この手法を広範な地質環境条件を対象とし、多様な不確実性を有するTRU廃棄物の処分（地層処分）の予察的解析に適用し、パラメータの相対的重要度の把握並びに成立条件の抽出を行った。解析の結果、インベントリ、線量換算係数、母岩の透水係数の相対的重要度が最も高く、それに次いで、母岩の水理特性、核種浸出期間、バリア材料の長期的変遷により影響を受ける収着係数やコロイドの影響等の重要度が高いことが示された。また、これらのパラメータを含む成立条件の抽出により、パラメータの評価値の設定や設計の妥当性、将来の技術開発目標値、不確実性を考慮した場合の安全裕度等を定量的に提示できることを示した。これらの情報は、処分の安全性に対する信頼性向上に資するものと考えられる。

A panoramic sensitivity analysis approach based on a statistic sampling method has been developed as aims at identification of important parameters of safety assessment and extraction of successful conditions for safety geological disposal based on such parameters in the development of the safety assessment method for radioactive waste disposal. Also, this approach was applied for preliminary safety assessment on geological disposal of TRU waste considering variety of geological conditions and including diverse uncertainties to identify the parameters with the high importance and to extract successful conditions. As the results, it was shown that inventory, dose conversion factor, hydraulic conductivity of rock were identified as highest importance parameters followed by hydraulic properties of rock, leaching rate of waste, sorption coefficient for both engineered and natural barriers which are expected to evolve over long time and the parameters related to colloids migration. Furthermore, successful conditions extracted based on such relative importance of the parameters can quantitatively demonstrate the sufficiency of parameters setting for assessment and validity of design requirements, the goal of R&D items in the future and the extent of the safety margin considering uncertainty. These results are available for development of reliability on safety.

キーワード

放射性廃棄物処分，TRU，安全評価，統計解析，包括的感度解析手法，不確実性，成立条件，妥当性，安全裕度，信頼性

Radioactive Waste Disposal, TRU, Safety Assessment, Statistical Analysis, Panoramic Sensitivity Analysis Approach, Uncertainty, Successful Conditions, Sufficiency, Safety Margin, Reliability.



大井 貴夫

処分材料研究グループ
統合化チームリーダー
副主任研究員
TRU廃棄物処分に係わる
性能評価に従事



曾根 智之

処分材料研究グループ
核種移行解析チーム所属
副主任技術員
TRU廃棄物処分に係わる
核種移行解析評価に従事



稲垣 学

処分材料研究グループ
核種移行解析チーム所属
副主任研究員
TRU廃棄物処分に係わる核
種移行解析評価に従事



三原 守弘

処分材料研究グループ
核種移行解析チームリーダー
副主任研究員
TRU廃棄物処分に係わる核
種移行解析評価に従事

1. はじめに

放射性廃棄物を地層処分するためには、処分施設や周辺の岩盤によって構成される処分システムの性能を評価し、安全基準と比較（安全評価）することにより、処分が長期的に安全であることを示す必要がある。この安全評価の信頼性を向上させるためには、評価期間が長期に及ぶことや地質が不均質性を有していること、さらには科学的知見が不十分であることなどの様々な要因により生じる不確実性を考慮することが重要になる¹⁾。

このような不確実性を考慮した安全評価を合理的に行うための手段としては「安全評価上重要度が高いと考えられるパラメータを同定すること」があげられる。これは、このようなパラメータの同定により、たとえば、不確実性が大きくとも（変動範囲が広くとも）安全性への影響が小さいパラメータに対しては過度な精緻化を避けるなどの対応により、詳細に行うべき評価や研究の絞り込みが可能になるからである。そのため、これまで、感度解析に基づく研究²⁾や不確かさ解析³⁾（入力パラメータに対して確率密度関数を用い、結果の不確実性を確率的に表現する解析）の中で重要度の高いパラメータの同定が行われている。また、評価の信頼性向上に資する有用な情報として、これらのパラメータの同定に加え「重要なパラメータに関する知見に基づいて処分が安全に成立するために必要なパラメータの条件（成立条件）を抽出すること」があげられる。これは、このような条件の抽出により、パラメータの設定や設計の妥当性、将来の技術開発目標値、不確実性を考慮した場合の安全裕度などの定量的な提示が可能になるからである。

これらの「重要度の高いパラメータの同定」及び「成立条件の抽出」を目的とする解析手法は、解析の合理性及び信頼性向上の観点から、多様な幅広い不確実性を有する対象の解析に適した安全評価手法であり、従来からのボトムアップ的な安全評価手法（様々な検討に基づいて設定したパラメータ値に対して安全性を検討する手法）を補完すると考える。

本研究では、多様な不確実性を有し、ジェネリックな評価段階であるため広範な地質環境条件を考慮する必要があるTRU廃棄物の処分（地層処分）を対象として、「重要度の高いパラメータの同定」及び「成立条件の抽出」を目的とした包括的感度

解析手法を開発してきた⁴⁾⁵⁾⁶⁾。本報では、この包括的感度解析手法の概要について記述するとともに、本手法を用いて実施した予察的な解析について報告する。

2. 包括的感度解析手法について

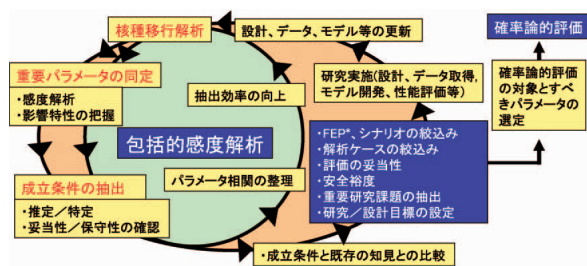
「重要度の高いパラメータの同定」及び「成立条件の抽出」のためには、処分場において生起する様々な現象を可能な限り考慮し、関連するパラメータを感度解析の対象として扱う必要がある。包括的感度解析手法は、処分場において生起する様々な現象を包括的に組み込んだ核種移行解析モデルと統計的手法に基づく感度解析ツールを用いて、重要度の高いパラメータを同定するとともに成立条件を網羅的に抽出する感度解析手法である。

図1に包括的感度解析手法の流れ（内側ループ）と解析結果の反映先の概念（外側ループ）を示す。以下、対象としたTRU廃棄物の処分（地層処分）の概念、核種移行解析モデル、重要度の高いパラメータの同定、成立条件の抽出について記述する。

2.1 TRU廃棄物の処分の概念

再処理施設またはMOX加工施設から発生する超ウラン（TRU）核種を含む放射性廃棄物のうち、含まれる α 核種の放射能濃度が比較的高く、浅地中処分以外の地下埋設（地層処分）が適切と考えられるものをTRU廃棄物と称している⁷⁾。

TRU廃棄物には金属や濃縮廃液を固化したものなど様々な形態があり、また、その中には有機物、硝酸塩などの化学的特性の異なる様々な物質が含まれている。また、核種としては、名前の由来となっているTRU核種の他に、核分裂生成物であるI-129や放射化生成物であるC-14が含まれ、むしろこの易溶性、非吸着性のI-129やC-14がTRU廃



* FEP：地層処分システムに影響を及ぼすと考えられるシステムの特質（Feature）、そこで生ずる事象（Event）や過程（Process）をいう。

図1 包括的感度解析手法の流れ（内側ループ）と解析結果の反映先の概念（外側ループ）

棄物の安全性を支配する核種となっている。

これらの廃棄物の処分においては、多種多様な廃棄物をその特性に応じて適切にグループ分けし、高レベル放射性廃棄物に比べて発生量が比較的多いこと（ガラス固化体 4 万本（ $6,000\text{m}^3$ ）に相当する TRU 廃棄物の量は $18,000\text{m}^3$ （TRU 核種を含む放射性廃棄物の量は $56,000\text{m}^3$ ）⁹⁾）、発熱性が少ないことから、地下の大断面坑道内にグループごとに集積配置し、廃棄体の隙間をセメント系材料で充填した上で、岩盤特性やグループの特性に応じて構造物または人工バリア（構造躯体、緩衝材）を配置する概念が構築されている⁸⁾。

TRU 廃棄物の処分の安全評価においてはこの概念に基づき、多量に使用するセメント系材料や硝酸塩、有機物（影響因子）などのバリア性能への影響、易溶性、非収着性の I-129 や C-14 の移行など、TRU 廃棄物に特徴的な事象を確実に考慮する必要がある。図 2 に TRU 廃棄物の処分概念と評価において考慮する事象の例を示す。

2.2 核種移行解析モデル

処分場において生起する様々な現象（関連するパラメータ）を感度解析の対象として扱うためには、それらのパラメータを含むモデルを一つの核種移行解析モデルに組み込み、相互影響を考慮した移行評価を行う必要がある。複数の複雑な事象を一つのモデルに組み込むことは必ずしも容易ではなく、場合によってはある程度の簡略化が必要となる。包括的感度解析においては、厳密性よりもむしろ網羅性を優先させた現象の定式化により、様々な事象が表現されている。これらの定式

化は複雑な事象を簡略化して表現することから、シャドウモデル⁹⁾（光と影の関係で、3 次元形状が 2 次元に単純化されて投影されることに由来）と称されている。

これまでの研究⁹⁾により、TRU 廃棄物に特徴的な事象や影響を考慮できる以下のシャドウモデルが構築されている。

- ① 多孔質媒体を対象とした核種の動きやすさに係る現象のシャドウモデル
（線形収着、非線形収着、沈殿／再溶解の考慮、溶存イオン、真性コロイド／擬似コロイドの移行の考慮）
- ② 核種移行の駆動力に係る現象のシャドウモデル
（ガス移行の影響、水理場の時間空間的变化）
- ③ 核種移行パラメータの時間／空間的な変遷に係る現象のシャドウモデル

ここでは、既存の核種移行解析モデル¹⁰⁾と異なるシャドウモデルの定式化について示す（既存の核種移行モデルの概念やそのモデル化については既報¹⁰⁾参照）。なお、人工バリア領域のモデル化においては、廃棄体領域内でコンクリートの遅延などの機能を考慮できるようにコンクリートバリア領域もモデル化することとした。

（1）核種の動きやすさに係る現象のシャドウモデル

核種の動きやすさに係るシャドウモデルでは、既存の核種移行解析モデルで扱っている「溶存イオンの移行」、「線形収着」、「沈殿／再溶解」に加えて、同一の式により「非線形収着」及び「真性コロイドの移行」、「擬似コロイドの移行」の取り扱いが可能となるような定式化を行った。この定式化においては、「核種の全濃度に対する溶液中の移動可能種の濃度（溶存イオン種の動きやすさで規準化）の比（濃度の比）」という概念を用いた。

この「濃度の比」を、既存の線形収着を仮定した移流分散の定式化において用いられる「遅延係数」の代わりに汎用的に用い、人工バリア領域、緩み域（EDZ）及び岩盤（多孔質媒体）における、溶存種、沈殿種など様々な存在形態の化学種の移行を表現する。

既存の線形収着を考慮した移流分散による物質移行は全濃度 M を用いて以下のように示される。

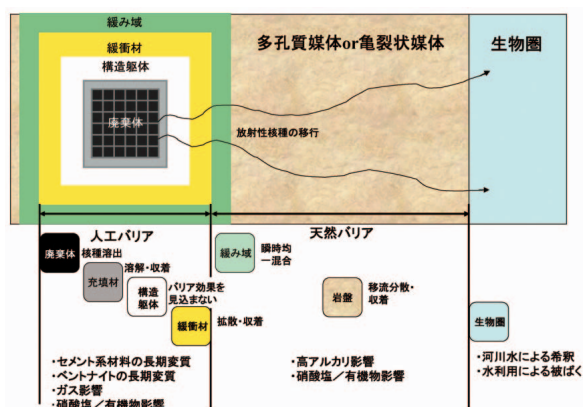


図2 TRU 廃棄物の処分概念と評価において考慮する事象の例

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} (d_L V + D) \frac{M}{Rd} \right) - \frac{\partial}{\partial x} V \frac{M}{Rd} - (\lambda M - \tilde{\lambda} \tilde{M}) \quad (1)$$

$$Rd = 1 + \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} Kdp, \quad (2)$$

$$\frac{1}{Rd} = \frac{\varepsilon C}{M} \quad (3)$$

M : 単位体積中の核種の全濃度
t : 時間
x : 距離
d_L : 分散長
V : 媒体中の地下水の実流速
D : 空隙水中の溶存イオン種の拡散係数
Rd : 遅延係数
λ : 崩壊定数
~ : 親核種の標記
ε : 空隙率
Kd : 吸着分配係数
ρ : 真密度
C : 空隙水中の溶存イオン種の濃度

ここで、「濃度の比」を拡散移動と移流移動に分けて以下のように定義する。

$$\alpha = \frac{\sum_i D_i m_i}{D \sum_i m_i} = \frac{1}{M} \frac{\sum_i D_i m_i}{D} = \frac{\varepsilon C \left(D_1 \frac{C_1}{C} + D_2 \frac{C_2}{C} \dots \right)}{MD} = \frac{\varepsilon C}{MD} D_m \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\sum_i V_i m_i}{V \sum_i m_i} = \frac{1}{M} \frac{\sum_i V_i m_i}{V} = \frac{\varepsilon C \left(V_1 \frac{C_1}{C} + V_2 \frac{C_2}{C} \dots \right)}{MV} = \frac{\varepsilon C}{MV} V_m \quad (5)$$

α : 拡散移動可能種の濃度の比
β : 移流移動可能種の濃度の比
m_i : 形態*i*で存在する核種の単位体積中の濃度
D_i : 移動可能種*i*の空隙水中拡散係数
C_i : 移動可能種*i*の空隙水中の濃度
D_m : 移動可能種の空隙水中の平均拡散係数
V_i : 移動可能種*i*の移流速度
V_m : 移動可能種の平均移流速度

ここで、空隙水中の溶存イオン種の拡散係数に対する平均拡散係数の比と溶存イオン種の移流速度に対する平均移流速度の比が等しい場合(3)式より、以下の関係式が得られる。

$$\frac{D_m}{D} = \frac{V_m}{V} \Rightarrow \alpha = \beta = \frac{\varepsilon}{M} \left(C \frac{D_m}{D} \right) = \frac{\varepsilon}{M} C_m \quad (6)$$

C_m : 空隙水中の移動可能種の平均濃度(溶存イオン種の動きやすさで規準化)

様々な形態の化学種を考慮するため(3)の空隙水中の溶存イオン種の濃度を(6)式の空隙水中の移動可能種の平均濃度で置き換え、移動可能種の平均濃度と全濃度の比を線形吸着を前提とした遅延係数ではなく、一般的な表現としてαで表わすと(7)式のように「多孔質媒体中での核種の動きやすさに係るシャドウモデル」が与えられる。これは、αを用いて様々な形態の移動可能種の物質移動を一般的に表現するものである。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} (d_L V + D) \alpha M \right) - \frac{\partial}{\partial x} V \alpha M - (\lambda M - \tilde{\lambda} \tilde{M}) \quad (7)$$

(7)式で与えられる核種の動きやすさに係るシャドウモデルでは、全濃度Mの対数を横軸、単位体積当たりの移動可能種の濃度αMの対数を縦軸に取り、全濃度の変動に応じて全濃度Mと移動可能種の濃度αMの関係を表わす傾き(傾き = 1 : 線形吸着, 傾き > 0, かつ ≠ 1 : 非線形吸着または、真性コロイドの移行, 傾き = 0 : 沈殿などの非可動種)や溶解度Cs, 遅延係数Rdなどを設定することによって、様々な形態の核種の移行を表現することが可能となる。

この表現では、移行形態に関するモデルやデータの知見が整った場合、その現象を個別に具体化することが可能になる。

たとえば、線形吸着が仮定でき、空隙水中の移動可能種の平均濃度が定義できる場合は(6)式から以下に示すような空隙水中の溶存イオン種に基づいて定義される遅延係数の換算値が算出され、それを(7)式に代入することにより、上記条件内での様々な形態の移動可能種の移動が解析される。

$$\frac{\varepsilon}{M} C_m = \frac{\varepsilon C}{M} \left(\frac{D_m}{D} \right) = \frac{1}{Rd} \left(\frac{D_m}{D} \right) = \frac{1}{Rd_m} \quad (8)$$

Rd_m : 様々な移動可能種の移動を考慮するための線形吸着が成り立つ場合の遅延係数の換算値

液相濃度C*が溶解度Csを超えると沈殿が発生する。移動可能種が溶存イオン種のみで、線形吸着が成り立つ場合、移動可能種の平均濃度と全濃

度の比 α は、瞬時沈殿/再溶解を仮定し、非可動種である空隙体積あたりの沈殿濃度を P とすることにより以下のように与えられる。

$$\alpha = \frac{\sum_i D_i m_i}{D \sum_i m_i} = \frac{(\varepsilon CD + 0 \cdot \varepsilon P \dots)}{MD} = \frac{\varepsilon}{M} C = \frac{1}{Rd} \quad (9)$$

$$M = \varepsilon(RdC + P)$$

$$P = \varepsilon(C^* + P - C_s)[H(C^* + P - C_s)]$$

$$C = C_s[H(C^* + P - C_s)] + (C^* + P)[H(-\{C^* + P - C_s\})] \quad (10)$$

ここで、

$H(x)$: ヘビサイドのステップ関数

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

(9)式を(7)式に代入することによって、以下のように溶解度に達した場合の線形収着を仮定した溶存イオン種の移流分散が与えられる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} (d_L V + D) C \right) - \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} V C - (\lambda M - \tilde{\lambda} \tilde{M}) \quad (11)$$

擬似コロイドについては、高レベル放射性廃棄物(HLW)の2次とりまとめ¹¹⁾の亀裂媒体を対象とした場合の移行モデルやデータが多孔質媒体においても適用可能と仮定とすると、擬似コロイドの移行を表現するパラメータと遅延係数の関係を用いることにより擬似コロイドの影響を表現することが可能になる。ここで、

C_c : 擬似コロイドに吸着した核種濃度

χ : 空隙水中の擬似コロイドの濃度

Kd_c : 擬似コロイドへの核種の分配係数

D_c : 空隙水中の擬似コロイドの拡散係数

V_c : 擬似コロイドの実流速

とおき、以下の関係を仮定する。

$$C_c = \chi Kd_c C \quad (12)$$

$$\frac{D_c}{D} = \frac{V_c}{V} \quad (13)$$

全濃度 M に対する移動可能種の濃度の比 α は、擬似コロイドに吸着した核種の濃度 C_c と擬似コロイド動きやすさを表す係数 D_c (拡散係数)または V_c (擬似コロイドの実流速)を用いて以下のように表される(線形収着及び擬似コロイドと溶存イオン種のみを考慮)。

$$M = \varepsilon(RdC + C_c) = \varepsilon C \left(Rd + \frac{C_c}{C} \right) = \varepsilon C (Rd + \chi Kd_c) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sum_i D_i m_i}{D \sum_i m_i} = \frac{\varepsilon(DC + D_c C_c)}{MD} \\ &= \frac{\varepsilon CD \left(1 + \frac{D_c}{D} \frac{C_c}{C} \right)}{MD} = \frac{\varepsilon C \left(1 + \frac{V_c}{V} \chi Kd_c \right)}{M} \\ &= \frac{\left(1 + \frac{V_c}{V} \chi Kd_c \right)}{(Rd + \chi Kd_c)} = \frac{1}{Rd_m} \end{aligned} \quad (15)$$

(14)式(15)式を(7)式に代入して整理すると以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} Rd_m \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} (d_L V + D) C \right) \\ &\quad - V \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda Rd_m C + \tilde{\lambda} Rd_m \tilde{C} \end{aligned} \quad (16)$$

評価においては、空隙水中の擬似コロイド濃度(χ)、移動可能種の擬似コロイドへの分配係数(Kd_c)、擬似コロイドの実流速と媒体中の地下水の実流速の比(V_c/V)を用いて、コロイドの影響を考慮した場合の遅延係数を与え、線形収着を仮定したモデルとして解析する。

(2) 核種移行駆動力に係る現象のシャドウモデル

① 2次元極座標系近似に基づくニアフィールド地下水流動

核種移行に対するセメント系材料や硝酸塩などの影響因子によるバリア材料の透水性の変遷の影響を考慮するため、個々のバリアごとに透水特性を与え、その特性の変遷に応じて与えられる水理場を表現するシャドウモデルを組み込んだ。この際、地下水の流向は坑道軸方向に直交するものと仮定した。

以下にその特徴を示す。(図3参照)

- ・廃棄体の坑道断面積を正方形で表現し、坑道の高さ H_w を用いて H_w^2 とする。
- ・廃棄体の幾何形状を断面積等価な2次元極座標系で近似し、坑道断面積 H_w^2 を等価な円の面積 πr_w^2 とする
- ・坑道単位長さ当たりの各バリアの全外側側面積(核種移行断面積)の1/2を各領域の地下水通過断面積として定義

2次元極座標系における地下水流動は以下の支配方程式で与えられる。

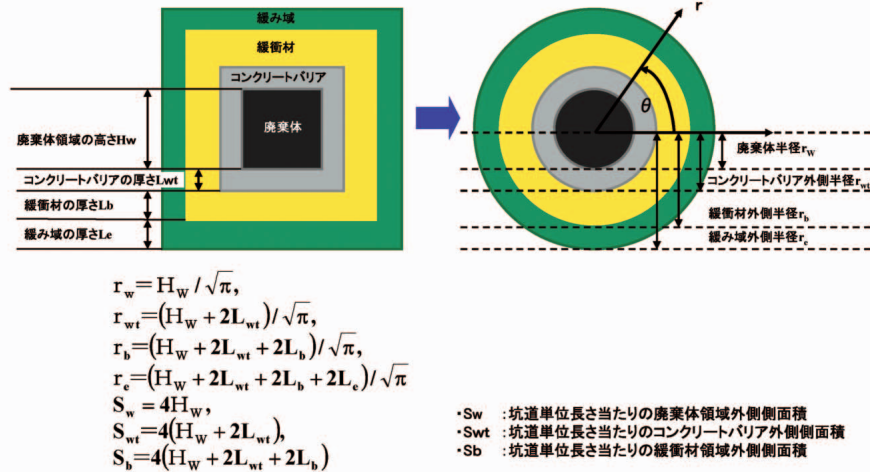


図3 ニアフィールド地下水流動のための二次元極座標系近似

$$\nabla(k\nabla P)=0 \quad (17)$$

ここで、

k : 透水係数

P : 水頭

である。

この解析解は境界条件から決定される定数A, Bを用いて以下のように示される。

$$P(r, \theta) = (Ar + Br^{-1}) \cos(\theta) \quad (18)$$

r が母岩内側までの半径 r_e に比べて十分大きく、 $r \rightarrow \infty$ を仮定した広域での動水勾配をhとしたときの母岩の平均水頭を P_R 、廃棄体中心の水頭を P_0 とおくと(18)式は以下のように示される。

$$\begin{aligned} P_R(r, \theta) &= -hr \cos(\theta) & (r \gg r_e, \quad r \rightarrow \infty) \\ P_0(0, \theta) &= 0 & (r = 0) \end{aligned} \quad (19)$$

また、各領域境界での水頭及び流速が一致することを考慮することにより、領域ごとに定数A, Bが決定される。

坑道単位長さ当たりの各領域内の地下水流量 Q_r は以下のように表される。

$$Q_r = k \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{dP(r, \theta)}{dr} r d\theta \quad (20)$$

この流量と坑道単位長さ当たりの各バリアの核種移行断面積の1/2を用いて、以下のように各領域内のダルシー流速 V_{da} を求める。

$$\begin{aligned} V_{da, w} &= Q_{r=r_w} / (S_w / 2) \\ V_{da, wt} &= Q_{r=r_{wt}} / (S_{wt} / 2) \\ V_{da, b} &= Q_{r=r_b} / (S_b / 2) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、

$V_{da, w}$: 廃棄体とコンクリートバリア境界のダルシー流速

$V_{da, wt}$: コンクリートバリアと緩衝材境界のダルシー流速

$V_{da, b}$: 緩衝材と緩み域境界のダルシー流速

② ガス発生移行に伴う水理場への影響のモデル化

ガスの排出経路としては、

- ・施設内部空隙水の排水
- ・任意の緩衝材部分の高濃度空隙水の間欠的排水が考えられる。

ここでは、地下水流速に及ぼすガス影響を単純化するため、ガスの排出経路として、施設内部空隙水の排水のみを考え、個々のバリア内におけるガス発生による地下水流速に対する影響を以下のようにモデル化した。

[廃棄体中の地下水流速]

$$v' = v + r \left(\frac{q_{GAS}}{S_w \times L_t} \right), (t_0 < t < t_{GAS}) \quad (22)$$

v' : ガス発生時の地下水流速(m/y)

v : ガス発生がない場合の地下水流速(m/y)

r : 地下水押し出しに寄与するガス割合(-)

q_{GAS} : ガス発生速度(m^3/y)

S_w : 単位坑道長さ当たりの廃棄体領域外側側面積(m)

L_t : 坑道長(m)

t_0 : ガス発生開始時刻(y)

t_{GAS} : ガス発生継続時間(y)

ここで,

$$t_{GAS} = \frac{q'_{GAS}}{q_{GAS}} \quad (23)$$

q'_{GAS} : ガス発生総量(m³)

である。

コンクリートバリア, 緩衝材領域における地下水流速の算出においては(22)式の「単位坑道長さ当たりの領域外側側面積」に, それぞれ, 「廃棄体領域外側側面積」, 「コンクリートバリア領域外側側面積」を与える。これは, 領域内側の面積を用いる方がガス発生による地下水流速への影響が保守的に与えられるからである。また, 緩み域及び母岩領域における地下水流速の算出においては, 単位坑道長さ当たりの領域外側側面積に「緩み域外側までの円の直径」を与えることとする。これらの面積は, 核種移行断面積や地下水通過断面積と異なることに注意する必要がある。

(3) 化学環境場及びバリア性能の時間/空間的な変遷に係る現象のシャドウモデル

TRU廃棄物の処分概念においては, 高pHを呈するセメント浸出液や, 廃棄体に含まれる有機物, 硝酸塩などの影響因子によるバリア材料の劣化が懸念されている。これらの影響因子による溶解度, 分配係数, 拡散係数, 空隙率, 透水係数などの核種移行特性やバリア特性の時間/空間的な変動を以下の2通りでモデル化する。

① バリアの劣化フロント進展モデル(バリア材の劣化に関する簡略モデル)

以下に示す移流分散方程式と反応式を用いて, バリア材料の劣化に係る影響因子の移流/分散移行(多孔質媒体)とその反応物質との反応を評価する。この際, 反応物質の濃度が0になる領域まで劣化が進展しているものとし, この劣化領域の時間空間的進展に応じて核種移行特性やバリア特性を変化させる。

$$\frac{\partial \varepsilon A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon (d_L V + D) \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \varepsilon \frac{\partial VA}{\partial x} - \varepsilon R(B) \quad (24)$$

$$\frac{\partial \varepsilon B}{\partial t} = -\varepsilon R(B) \quad (25)$$

ここで,

A : 影響因子の濃度

R : 反応速度

B : 反応物質の濃度

(24)式-(25)式より

$$\frac{\partial \varepsilon (A-B)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon (d_L V + D) \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \varepsilon \frac{\partial VA}{\partial x} \quad (26)$$

$$C \equiv A-B = \begin{cases} A, & \text{if } B=0 \\ -B, & \text{if } B>0 \end{cases}$$



$$\frac{\partial \varepsilon C}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon (d_L V + D) \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial VC}{\partial x} \right\} H(C) \quad (27)$$

② 劣化時刻の設定に基づくバリア特性の時間的変化の設定

人工バリア及び天然バリアの各領域において, 以下のバリアの変遷に係る時刻を設定し, それらに応じて入力パラメータの値を変化させることにより核種移行特性やバリア特性の変化を考慮する。

- ・人工バリア健全性維持時間
- ・分配係数変動開始時刻
- ・溶解度変動開始時刻
- ・空隙率, 拡散係数劣化開始時刻
- ・透水係数劣化開始時刻

(4) モデルの検証

「多孔質媒体を対象とした核種の動きやすさに係る現象のシャドウモデル」については, 既存の移流/分散モデルと同一の機能となるようにパラ

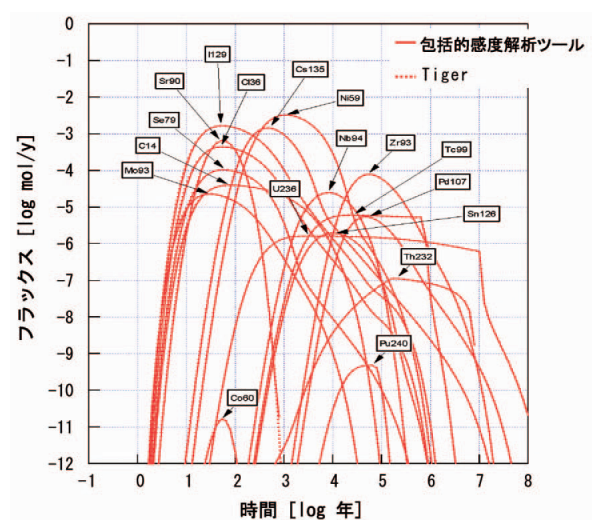


図4 既存の移流・分散コードTigerとの比較

メータを設定することにより、ベンチマークが可能となる。図4に、線形収着、沈殿/再溶解を考慮した既存の移流/分散モデル(Tiger)¹⁰⁾との比較結果を示す。図4は、両コードの結果がよく一致していることを示している。

また、「擬似コロイドの影響」、「種移行の駆動力に係る現象のシャドウモデル(ガス移行の影響)」及び「核種移行パラメータの時間/空間的な変遷に係る現象のシャドウモデル」については、それらの機能の考慮の有無による線量への影響を定性的に検討し、合理性の観点からその妥当性を確認した。

2.3 重要度が高いパラメータの同定

「重要度が高い」ということは「変動範囲が広い、かつ、あるいは、パラメータの変化による線量の変化率(パラメータの影響度)が大きい」ため、与えられた範囲の変動により線量が著しく変化し、しかも基準値を超えるようなパラメータ」を意味する。検討においては、対象となるパラメータの変動範囲を設定し、その範囲内でパラメータを変動させ、複数のパラメータの変動の組み合わせを再現するため多数回の解析を実施する。そして、パラメータの変動範囲を横軸、線量値を縦軸に取り、最小二乗法を用いて全統計解析結果に対する多項式近似曲線を求める。得られる多項式近似曲線は、パラメータの変動による線量の変化の傾向や安全性に対する重要度を与える重要な情報である。これらの傾向などを様々な観点から整理することにより、個々のパラメータの安全に対する特性を把握することが可能になる。

図5に、多孔質媒体を対象として天然バリアの透水係数、動水勾配、空隙率をそれぞれ、 10^{-8}m/s 、0.01、0.2に設定し、他のパラメータを設定した範

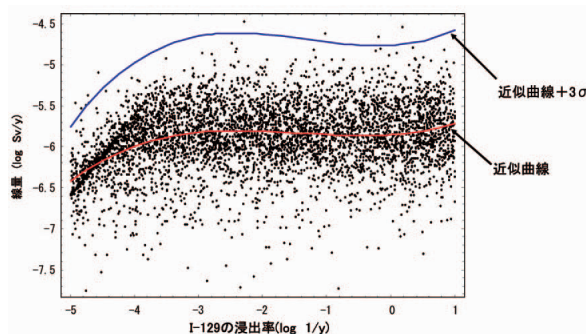


図5 I-129の浸出率の影響特性

囲内で変動させた場合のI-129の線量に対する浸出率の特性を示す。図5から、I-129の浸出率は線量の変化に影響を与える領域($<10^{-3}(1/y)$)と影響を与えない領域($10^{-3}(1/y)<$)に分かれることがわかる。これは、天然バリアの物質移行特性とのバランス(核種の滞留またはよどみの発生の影響)で決まる特性である。図6に天然バリアの透水係数をパラメータとした場合のI-129の浸出率と線量の関係を示す。図6から、天然バリアの透水係数が大きい場合ほど、明確な線量の感度が示される浸出率の上限値は大きく、天然バリアの透水係数が小さくなるに従い、その上限値が小さくなり、天然バリアの透水係数が 10^{-8}m/s の場合は $10^{-3}(1/y)$ の浸出率を境に線量の浸出率に対する感度が異なることがわかる。このことは図5の結果と整合的である。

重要度の高いパラメータの同定においては、与えられた変動範囲に対して示される多項式近似曲線が基準線量を超えるようなパラメータを対象とし、多項式近似曲線によって示される線量(対数)の最大値と最小値の差を重要度(相対的重要度)の指標とする。この場合、パラメータの変動範囲の設定によっては、相対的重要度が変化する。そこで、設定範囲の違いによる影響を確認するとともに、パラメータの影響度の特性の検討に資するため、パラメータ変動に対する線量の変化率(相対的影響度)を合わせて求めることとする。

2.4 成立条件の抽出

核種移行に係る様々なパラメータに対して、保守性を考慮した変動範囲が設定され、それぞれその範囲内でパラメータが変動するとする。このと

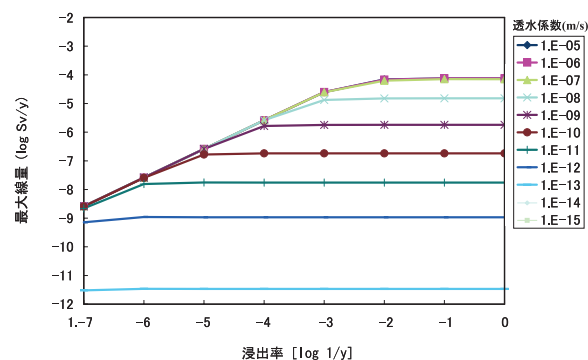


図6 透水係数ごとのI-129の浸出率と最大線量の関係(TRU廃棄物処分概念検討書のデータを使用)

き、特定のパラメータAの値がB以下でありさえすれば、線量が基準となる線量を下回るとする。

この場合、パラメータAがB以下であることは、他のパラメータが想定した変動範囲にあるという制約のもとで処分が安全に成立する条件（成立条件）となる。

このような成立条件を可能な限り網羅的に抽出することができれば、評価の妥当性や安全裕度の提示、さらには、今後の個別研究に対する開発目標の提示が可能になる。

以下、成立条件の抽出手順／手法を示す。

「重要度の高いパラメータの同定」を含めた抽出手順は以下の通りである。

- ① 重要度の高いパラメータの同定
- ② 成立条件の推定
- ③ 推定した成立条件の特定
- ④ 確定した成立条件の保守性／妥当性の確認

成立条件の抽出においては、「2,3重要度の高いパラメータの同定」において述べた「重要度の高いパラメータ」を順次対象としていくことがポイントとなる。線量の感度が小さい、または、変動させても線量が基準を超えないようなパラメータを対象とすることは明らかに非効率的である。

成立条件の推定においては、統計的手法が利用される。重要度の高いパラメータの同定において求めた近似曲線は、パラメータが任意の値を取る場合の線量の平均値の連続線である。ここで「解析結果はその平均値を中心に分布し、その分布は正規分布に準じている」と仮定する。このとき、平均値から 3σ の領域は、99.7%の割合で解析結果が含まれることを意味する。この領域と基準線量の交点に基づき、基準線量以下になるパラメータ値を見出す場合、そのパラメータ値を取ることによって基準線量以下になる割合は分布の片側の超過分を差し引いた割合に相当する。従って、 3σ と基準線量が交わるパラメータ値は、99.85% ($99.7 + 0.15$)の割合で解析結果が線量基準を下回る境界値を意味することになる。

一方、図5に示すように、線量への影響度はパラメータが取る値によって異なっている。そこで、 3σ の算出においては、解析結果全体の分散を用いるのではなく、この非線形性を考慮することとする。そのため、パラメータの変動領域をいくつかの領域（バンド）に区分し、バンドごとに分散を求め、求められたバンドごとの 3σ を用いて得

られる曲線と基準線量との交点を成立条件の推定値とする。

図5と同じ条件で解析した天然バリア長さの特性を図7に示す。この結果から、図5で用いた3つの解析条件と他のパラメータが与えられた変動範囲内にあるとの制約のもとでは、約400mの天然バリアがあれば、 $10\mu\text{Sv/y}$ の基準線量を下回る可能性があることがわかる。

上記の値は、成立条件の推定値であることに注意する必要がある。これは、計算環境の制限により、与えられた変動パラメータ（パラメータ数は約60）に対して必ずしも十分な統計解析を行うことができないことによるものである。そこで、推定した成立条件を確定するため、保守的決定論解析を実施する。これは、推定した成立条件に係るパラメータ以外の他のパラメータを保守的に設定し、成立条件に係るパラメータを変動させ、線量基準値以下となる値または、その組み合わせ値を特定するものである。

成立条件を特定した場合、その保守性や妥当性の程度（それによって示されるパラメータの組み合わせの起こり易さやなど）について把握しておくことが重要となる。これは、保守的決定論解析と統計解析結果との比較により可能である。保守性については、成立条件を与える保守的決定論解析の結果が、バラツキを持つ統計解析の結果の最保守値となっていることで確認できる。妥当性の程度については、統計解析の結果群のバラツキの大きさから推察できる。保守的決定論解析の結果が最保守値となるような統計解析の結果群のバラツキが大きい場合は、抽出した成立条件はかなり特異なケースの組み合わせとみなすことができる。一方、統計解析の結果群のバラツキが小さい

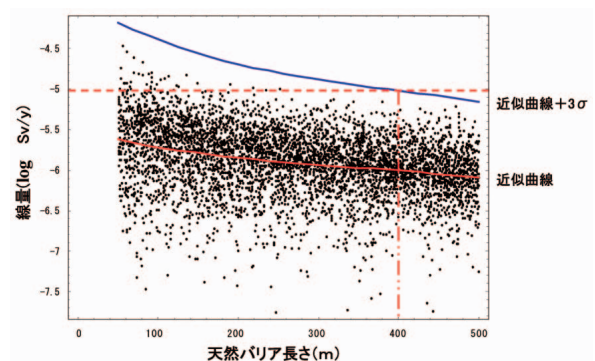


図7 天然バリア長さの影響特性

場合は、抽出した成立条件は起こりやすいパラメータの組み合わせとみなされる。

3. 成立条件の予察的抽出

包括的感度解析手法の核種移行モデルでは、従来の核種移行評価コードにおいて直接扱われていないガス移行及び擬似コロイドによる核種移行への影響が考慮されている。2.1(4)で示したように従来と同様の評価が可能であること及びこれらの影響が考慮されていることにより、包括的感度解析手法により与えられる成立条件はそれらを考慮しない場合に比べて保守的となる。

ここでは、予察的に、これまで記述した包括的感度解析手法を用いて重要度の高いパラメータを同定し、それに着目することにより基準となる線量を下回る成立条件の抽出を行う。

3.1 解析の概要

本予察解析における対象、評価体系／概要を以下に示す。

① 対象廃棄体／核種

TRU廃棄物の処分（地層処分）に関する既存の評価⁸⁾において、グループ1として分類された廃銀吸着材中のI-129の影響を評価する。

② 評価体系／概要

図8に評価体系を示す。今回の予察解析ではコンクリートバリアは考慮せず、母岩として多孔質媒体を考え、河川水シナリオに基づいて算出された生物圏での線量換算係数を用いて核種移行率（Bq/y）を被ばく線量（Sv/y）に換算し、想定した基準線量（ $10\mu\text{Sv/y}$ ）と比較した。評価においては、線形収着を仮定し、瞬時沈殿／再溶解、溶存イオン種並びに擬似コロイドの移行、ガスによる地下水流速の増加を考慮することとした。また、化学環境場及びバリア性能の時間／空間的な変遷

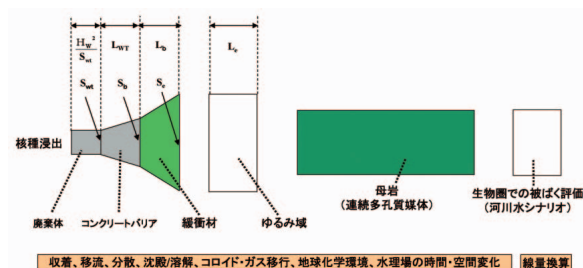


図8 評価体系

に関してはバリアの変遷に係る時刻の設定に基づいてバリア特性の時間的変化を設定するモデルを用いた。

また、一様分布を仮定した約60のパラメータからランダムサンプリングを行い2,000回以上の統計解析を実施した。

パラメータの変動範囲は保守性を考慮して幅広に設定した。用いたパラメータ及びその変動範囲を表1に示す。さらに、設定したパラメータの中で、比較的不確実性が小さいと考えられる設計パラメータや解析条件、線量換算係数に対しては基本的な値（基本設定値）を設定した。また、今回の解析においては、天然バリアの透水係数、動水勾配、空隙率の組み合わせを考え、その中から任意の組み合わせを基本設定値として設定した。それらを表2にまとめる。

3.2 統計解析の結果

保守的に幅広に変動範囲を設定したすべてのパラメータを対象とした統計解析（1次統計解析）の結果並びに相対的重要度及び相対的影響度を図9に示す。相対的影響度はパラメータ1桁の変動に対する線量の変化を指標として算出した。図9から天然バリアの透水係数、I-129の線量換算係数、I-129のインベントリが相対的重要度の高いパラメータであることがわかる。図10に相対的重要度が高い透水係数、線量換算係数、インベントリの多項式近似曲線、 3σ 曲線と基準線量との比較結果を示す。図10から、透水係数、線量換算係数、インベントリはそれぞれ線量と正の相関を有していることがわかる。また、与えられた変動範囲内で3つのパラメータを単独で変動させても、線量は $10\mu\text{Sv/y}$ 以下にならないことがわかる（成立条件の推定1）。

透水係数、線量換算係数、インベントリを基本設定値とし、他のパラメータを変動させた統計解析（2次統計解析）の結果並びに相対的重要度及び相対的影響度を図11に示す。本図から動水勾配、天然バリア長さ、天然バリア空隙率、分配係数、分散比率、核種浸出期間、擬似コロイド影響などに関するパラメータが相対的重要度の高いパラメータであることがわかる。

透水係数、線量換算係数、インベントリを含む成立条件を保守性を担保しつつ、より現実的に抽出するため、これらの相対的重要度の高いパラ

表1 パラメータ及び入力範囲

No.	分類	パラメータ名	単位	変動範囲	No.	分類	パラメータ名	単位	変動範囲	
1	設計条件	I-129のイベントリ	Bq	5.11E+12～5.11E+14	33	バリア特性	緩衝材劣化後空隙拡散係数	m ² /s	6.0E-12～4.0E-09	
2		廃棄体の処分量	m ³	318	34		緩衝材健全時空隙率	-	0.33～0.4	
3		廃棄体埋設比率	-	0.29	35		緩衝材劣化後空隙率	-	0.33～0.65	
4		廃棄体定置領域高さ	m	5.5*((0.5)0.5～(2)0.5)	36	分配係数	母岩・多孔質媒体の空隙拡散係数	m ² /s	2.5E-12～1.0E-10	
5		廃棄体定置領域幅	m	4.5*((0.5)0.5～(2)0.5)	37		廃棄体健全時のKd	m ³ /kg	1.0E-07～1.0E-00	
6		坑道全長	m	44.3*((0.5)～(2))	38		廃棄体劣化後のKd	m ³ /kg	1.0E-07～1.0E-00	
7		坑道全長の変動割合	-	0.5～2	39		緩衝材健全時のKd	m ³ /kg	0	
8		コンクリートバリアの厚さ	-	0	40		緩衝材劣化後のKd	m ³ /kg	0	
9		緩衝材厚さ	m	0.1～3	41		化学ブルーム到達前の母岩に対するKd	m ³ /kg	1.0E-07～1.0E-04	
10		充填材モルタル真密度	kg/m ³	2.580	42		化学ブルーム到達中の母岩に対するKd	m ³ /kg	1.0E-07～1.0E-04	
11		緩衝材真密度	kg/m ³	2.680	43		化学ブルーム到達後の母岩に対するKd	m ³ /kg	1.0E-07～1.0E-04	
12		解析条件	岩真密度	kg/m ³	2.700	44	溶解度	Iの溶解度	mol/l	易溶性
13	核種浸出期間		y	0.1～107	45	化学ブルーム到達時のIの溶解度		mol/l	易溶性	
14	緩み域の厚さ		m	0.5～5	46	コロイド影響	廃棄体領域での疑似コロイドの流速比率	-	1～2	
15	緩み域流速増倍比率		-	1～100	47		廃棄体領域での疑似コロイド中の核種量(XKc)	-	0～1	
16	人工バリア領域の分散比率		-	0.1	48		緩衝材領域での疑似コロイド流速比率	-	1～2	
17	天然バリア領域の分散比率		-	0.01～1	49		緩衝材領域での疑似コロイド中の核種量(XKc)	-	0～1	
18	天然バリア長さ		m	50～500	50		緩衝材のコロイドフィルとレーション間透水係数	m/s	1.00E-13	
19	地質環境		母岩・多孔質媒体の透水係数	m/s	1.0E-10～1.0E-06		51	母岩領域での疑似コロイド流速比率	-	1～2
20			母岩・多孔質媒体空隙率	-	0.15～0.6		52	母岩領域での疑似コロイド中mp核種量(XKc)	-	0～1
21			動水勾配	-	0.004～0.23		53	ガス影響	地下水の押し出しに寄与する発生したガスの割合	-
22			線量換算係数(河川水シナリオ)	Sv/Bq	2.31E-17～3.18E-15	54	ガス発生による施設ボイド水の排水開始時刻		y	0
23			廃棄体からの核種浸出期間	y	0.1～1.0E+05	55	グループ1のガス発生総量		m ³	6.8E+01～6.8E+03
24	生物圏モデルバリア特性	廃棄体健全時透水係数	m/s	1.0E-13～1.0E-11	56	場の変遷	グループ1のガス発生速度	m ³ /y	4.6E-03～4.6E-01	
25		廃棄体劣化後透水係数	m/s	1.0E-13～1.0E-05	57		母岩の化学ブルーム到達割合	-	0～1.0	
26		廃棄体健全時空隙拡散係数	m ² /s	1.0E-12～2.0E-11	58		人工バリア健全性維持時間	y	10.E+03～1.0E+08	
27		廃棄体劣化後空隙拡散係数	m ² /s	1.0E-12～4.0E-09	59		分配係数変動開始時間	y	人工バリア健全性維持時間	
28		廃棄体健全時空隙率	-	0.1～0.2	60		溶解度変動開始時間	y	人工バリア健全性維持時間	
29		廃棄体劣化後空隙率	-	0.1～0.35	61		空隙率・拡散係数の劣化開始時刻	y	人工バリア健全性維持時間	
30		緩衝材健全時透水係数	m/s	2.0E-13～5.0E-11	62		空隙率・拡散係数の劣化継続期間	y	∞	
31		緩衝材劣化後透水係数	m/s	2.0E-13～1.0E-05	63		透水係数の劣化開始時刻	y	人工バリア健全性維持時間	
32		緩衝材健全時空隙拡散係数	m ² /s	6.0E-12～2.0E-09	64		透水係数の劣化継続期間	y	∞	

表2 パラメータの基本設定値

No.	分類	パラメータ名	単位	基本条件
1	設計条件	I-129のイベントリ	Bq	5.11E+13
2		廃棄体定置領域高さ	m	5.5
3		廃棄体定置領域幅	m	4.5
4		坑道全長	m	44.3
5		緩衝材厚さ	m	1
6	解析条件	核種浸出期間	y	0.1
7		天然バリア長さ	m	100
8		緩み域厚さ(EDZ長さ)	m	3
9		天然バリア領域の分散比率	-	0.1
10		地下水押し出しに対するガスの寄与割合	-	0.1
11		Iの疑似コロイド流速比率	-	1.3
12	地質環境	母岩(多孔質媒体)の透水係数	m/s	1.00E-09
13		母岩(多孔質媒体)空隙率	-	0.3
14		動水勾配	-	0.05
15	生物圏モデル	線量換算係数(河川水シナリオ)	Sv/Bq	3.18E-15

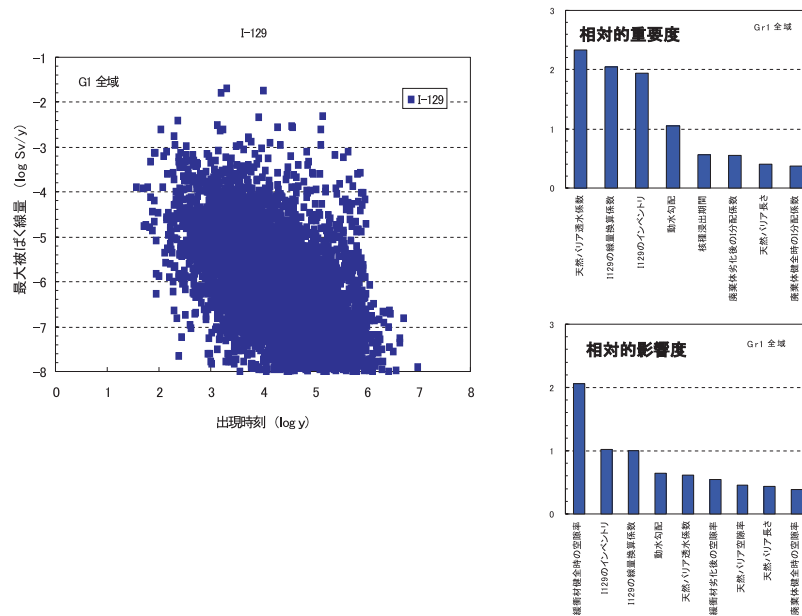


図9 1次統計解析の結果とパラメータの相対的重要度・影響度

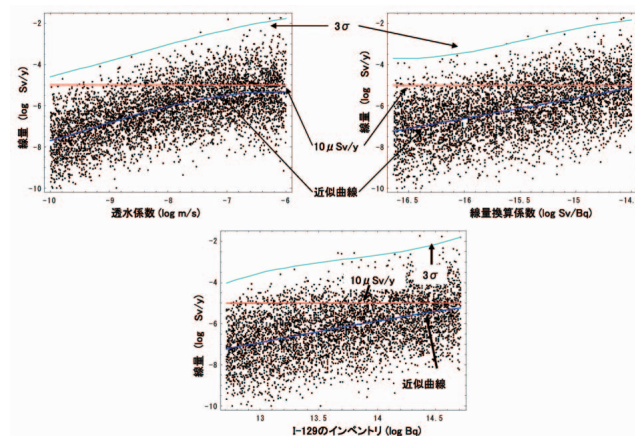


図10 成立条件の推定(基準線量と3σ曲線の比較)

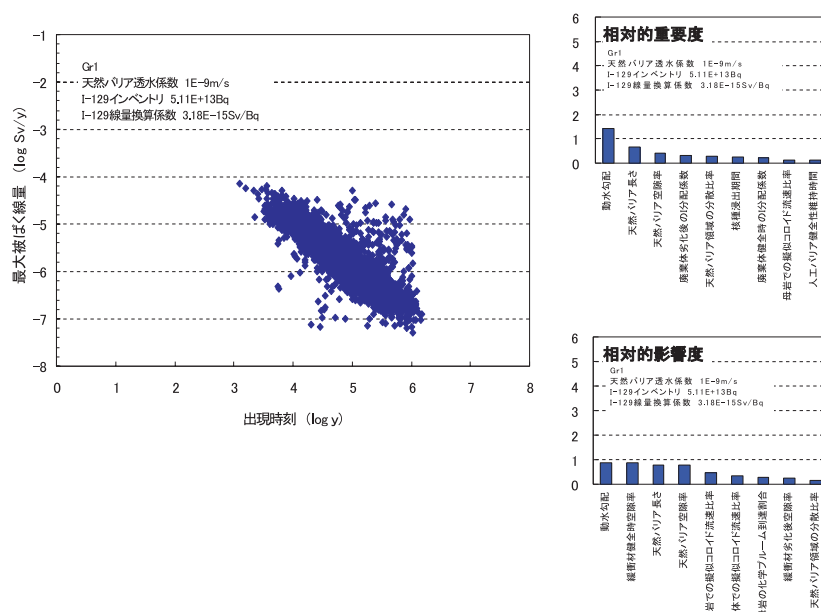


図11 2次統計解析の結果とパラメータの相対的重要性・影響度

メータの中の設計パラメータ及び解析パラメータを基本設定値で固定し、他のパラメータを保守的に設定し、3つのパラメータを変動させた保守的決定論解析を実施した。

図12に、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る結果を与える線量換算係数とインベントリの関係を透水係数の値ごとに示す。また、図12にこの解析において設定したパラメータを合わせて示す。図12に示した透水係数のラインの左下の領域は、透水係数がラインの数字よりも小さい場合に、線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下と

なる線量換算係数とインベントリの条件の組み合わせを表わしている。

図12からわかるように、透水係数が 10^{-10}m/s であることを示すラインと線量換算係数が基本設定値($3.18 \times 10^{-15}\text{Sv/Bq}$)であることを示すラインとが交わる点は、 $7 \times 10^{13}\text{Bq}$ (図中青丸参照)で、これはインベントリの基本設定値($5.11 \times 10^{13}\text{Bq}$)より大きい値であることがわかる。

このことは透水係数が 10^{-10}m/s 以下の場合には、線量換算係数が基本設定値(3.18×10^{-15}

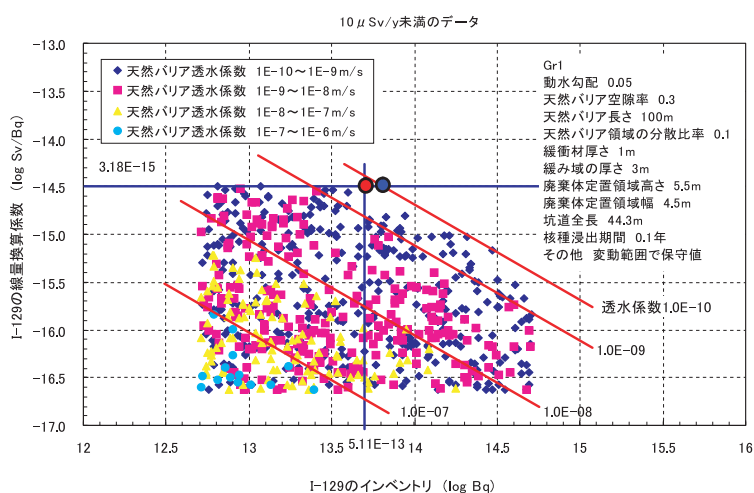


図12 成立条件の特定(透水係数ごとに示された $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る結果を与える線量換算係数とI-129のインベントリの関係)

Sv/Bq), インベントリが 7×10^{13} Bq (図中青丸参照)で, 他のパラメータが設定した変動範囲にある場合, 線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回ることを意味する (成立条件の特定)。

図13に, 上記条件の場合の保守的決定論解析の結果と上記条件で固定したパラメータ以外のパラメータを変動させた場合の統計解析 (3次統計解析) の結果を示す。図13から, 抽出された条件が確かに成立条件となっていること, 及び統計解析の結果のパラッキが比較的大きく, 上記条件は稀なパラメータの組み合わせを考慮しても成り立つ保守的な条件であることが分かる。また, 上記結

果は, I-129のインベントリの基本設定値に関して 3 ~ 4 割程度の安全裕度が見込まれることを示すものである (成立条件の保守性 / 妥当性の確認)。

一方, 図12から, 透水係数と線量換算係数, インベントリがそれぞれ基本設定値である 10^{-9} (m/s), 3.18×10^{-15} (Sv/Bq), 5.11×10^{13} (Bq) の場合には, 線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回ることがわかる (図12赤丸参照)。

また, 透水係数が 10^{-8} m/sで, 線量換算係数が 3.18×10^{-15} (Sv/Bq)の場合, インベントリのみで線量を基準とした $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下にするためには, インベントリを基本設定値よりも1桁以上小さくする必要があることがわかる (図12の透水係数 $1.0\text{E-}08$ m/sのライン参照)。

これらの結果を受け, 透水係数が基本ケース (10^{-9} m/s) の場合の成立条件について検討した。図14に透水係数を基本設定値 (10^{-9} m/s) とし, それ以外は図13と同じ条件で実施した統計解析 (4次統計解析) の結果並びに相対的重要度及び相対的影響度を示す。図14には透水係数, 線量換算係数, インベントリや上記の設計パラメータ及び解析パラメータを基本設定値で固定し, 他のパラメータを保守的に設定した保守的決定論解析の結果も合わせて示す。図14から, バリア材料の劣化に関連するパラメータや擬似コロイド, ガス影響などに関するパラメータが相対的重要度の高いバ

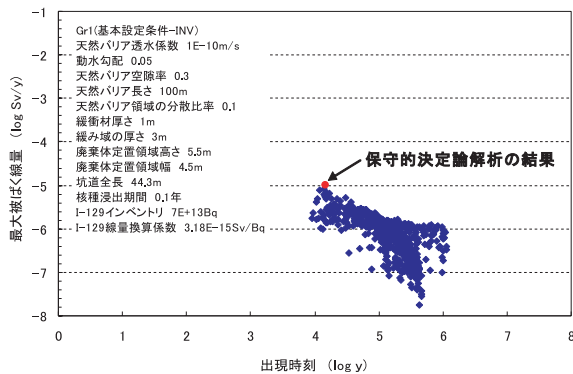


図13 成立条件の保守性 / 妥当性の確認 (3次統計解析)

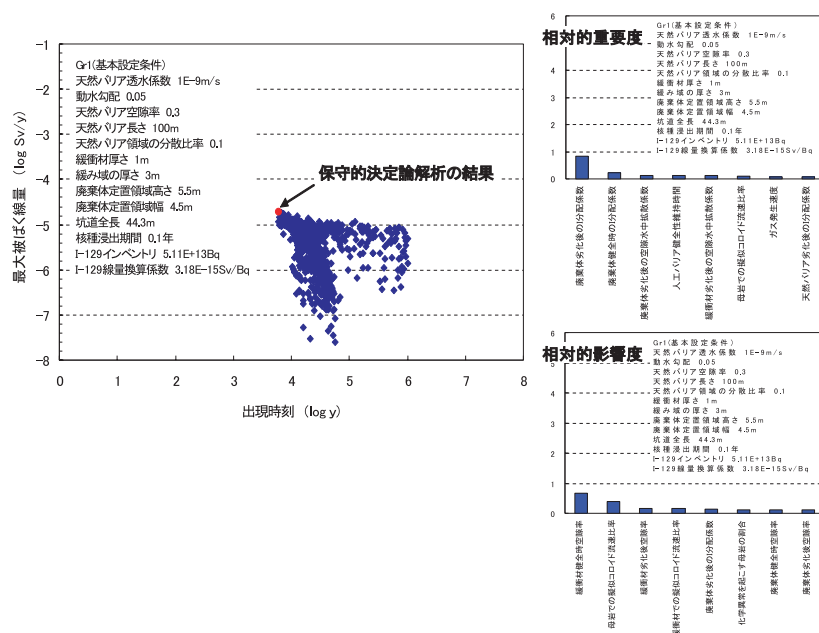


図14 4次統計解析の結果とパラメータの相対的重要度・影響度

ラメータであることがわかる。

透水係数、線量換算係数、インベントリを基本設定値で固定した場合の成立条件を抽出するため、図14の条件に加え、相対的重要度の高い擬似コロイドの流速比、地下水押し出しに対するガスの寄与割合を基本設定値で固定し（表2の条件）、他のパラメータを保守的に設定した保守的決定論解析を実施した。

図15に、表2の条件の場合の保守的決定論解析の結果と表2の条件で固定したパラメータ以外のパラメータを変動させた場合の統計解析（5次統計解析）の結果を示す。図15から、表2の条件が確かに成立条件となっていることが分かる。

今後、より網羅的に成立条件を抽出するため、バリア材料の劣化に関連するパラメータなどを含めたさらなる高次の統計解析を行う予定である。

4. 結論

広範な地質環境条件と多様な不確実性を有するTRU廃棄物の処分に包括的感度解析手法を適用し、重要度の高いパラメータの同定及び成立条件の抽出を予察的に行った。以下に、抽出した成立条件あるいは得られた知見をまとめる。

- ① I-129の線量換算係数とI-129のインベントリがそれぞれ基本設定値（ 3.18×10^{-15} (Sv/Bq)）、（ 5.11×10^{13} (Bq)）で、他のパラメータが設定した変動範囲内にある場合、天然バリアの透水係数が 10^{-10} m/s以下であれば線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る。
- ② インベントリが基本設定値よりも3～4割多い場合においても、上記条件の場合には線量は基準とした $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る。

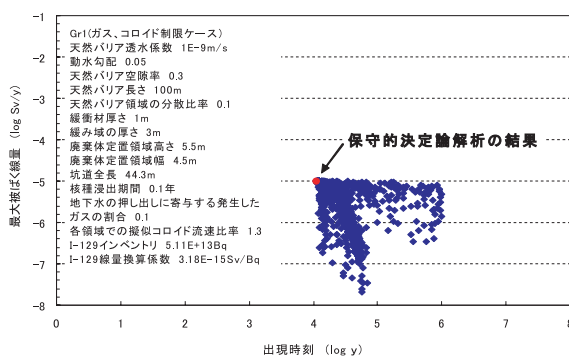


図15 成立条件の保守性／妥当性の確認（5次統計解析）

- ③ 線量換算係数とインベントリがそれぞれ、基本設定値で、透水係数が 10^{-9} m/s以下の場合、線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回る。
- ④ 透水係数が 10^{-9} m/sで、線量換算係数が 3.18×10^{-15} (Sv/Bq) の場合は、線量が基準とした $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回するためには、インベントリが基本設定値よりも1桁以上小さくなる必要がある。
- ⑤ 透水係数が基本設定値（ 10^{-9} m/s）の場合は、表2の条件で、それ以外のパラメータが設定した変動範囲内にある場合、線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る。

5. おわりに

重要度が高いパラメータの同定及び処分が安全に成立する条件（成立条件）を抽出することが可能な包括的感度解析手法を構築した。この手法を用いることにより、設計値や核種移行パラメータ値の設定の妥当性、不確実性評価の対象の絞込み、将来の技術開発目標値の設定、安全裕度の提示などに資する有用な情報が得られる。これらの情報は、特に、多様な不確実性や幅広い地質環境条件を評価対象とする場合に、従来からのボトムアップ的な安全評価手法を合理性及び信頼性向上の観点から補完し、信頼性の高い評価を行うために重要になると考える。

今後、個別の現象に関する研究により得られるパラメータの相関関係などの知見を反映させ、評価対象パラメータの数を合理的に減らすことなどにより、成立条件の抽出効率の向上、精度の向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) OECD/NEA Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-operation and Development: "Post-Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose", Radioactive Waste Management, ISBN 92-64-02075-6, p25 (2004).
- 2) 大井貴夫, 三原守弘, 他: "TRU廃棄物処分におけるN.F.水理場の変遷に関する研究(1)", 日本原子力学会2002年秋の大会予稿集, F41, p.641 (2002).
- 3) 中山真一, 武田聖司, 他: "不確かさを考慮した安全評価研究", JAERI-Conf 2003-018, JP0350657, p.17 (2003).
- 4) 高瀬博康, 稲垣学, 他: "TRU廃棄物処分に関する包括的感度解析手法の開発", 日本原子力学会2001年秋の大会予稿集, O17, p.895 (2001).
- 5) 大井貴夫, 曾根智之, 他: "包括的感度解析手法を用いたTRU廃棄物処分の成立性に関する検討(1)", 日本原子力学会2004年春の年会予稿集, H35, p.841

(2004).

- 6) 曾根智之, 大井貴夫, 他: “包括的感度解析手法を用いたTRU廃棄物処分の成立性に関する検討(2)”, 日本原子力学会2004年春の年会予稿集, H36,p.842 (2004).
- 7) 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会: “TRU核種を含む放射性廃棄物の処理処分について”, p9, 平成3年7月30日.
- 8) 核燃料サイクル開発機構, 電気事業連合会: “TRU廃棄物処分概念検討書” JNC TY1400 2000-001, TRU TR-2000-01.
- 9) H.Takase, P. Grindrod et. al: “On EBS Modelling for Performance Assessment: Using Shadow Models to identify Robust System Responses”, Mat. Res. Symp. Proc., Vol. 506, pp 847-856 (1998).
- 10) 三原守弘 大井貴夫: “パラメータの時間的变化を考慮した核種移行解析コード(TIGER)の開発”, サイクル機構技報, No.22,p27 (2004).
- 11) 核燃料サイクル開発機構: “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価”, JNC TN1400 99-023, p 1-52(1999).